

**В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук (НАН Беларуси),  
**И. А. ТРУСОВА**, д-р техн. наук (БНТУ),  
**В. Е. РОТЕНБЕРГ**, канд. техн. наук (ВГТУ),  
**Т. В. ФАЙН**, канд. физ.-мат. наук, **С. В. КОРНЕЕВ** (ИТМО НАН Беларуси),  
**Р. Б. БАЙС**, канд. техн. наук (БНТУ)

## **ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВКАХ ПРИ НАГРЕВЕ ПЕРЕД ПРОКАТКОЙ**

Поскольку фазовые переходы сопровождаются изменением структуры, это может приводить к резким изменениям как теплофизических, так и термомеханических свойств сталей. Сложность проблемы состоит в том, что изменения происходят одновременно, так что необходимо учитывать совместный эффект этих изменений. Другая проблема состоит в том, что диффузионные фазовые превращения растянуты во времени, и скорость превращений зависит от ряда факторов. Хотя имеются некоторые теоретические оценки кинетики превращений, в полной мере описать эти явления теоретически не удастся; на практике используются различные эмпирические зависимости, которые получены при определенных режимах нагрева и охлаждения и не всегда могут быть обобщены на произвольные режимы. В то же время интерес представляет также модельное изучение напряжений и деформаций при фазовых переходах, целью которого является оценка различных факторов, влияющих на термомеханическое состояние заготовок.

В данной работе будут рассмотрены фазовые переходы на примере эвтектоидного превращения сплава железа с углеродом, которое происходит при температуре около 727 °С и характеризуется значительным тепловыделением и изменением плотности сплавов.

**Тепловые эффекты при фазовых превращениях.** Фазовые превращения сопровождаются значительными тепловыделениями или поглощениями тепла, что приводит к существенным искажениям температурных полей, которые, в свою очередь, меняют распределение деформаций и напряжений в заготовках. Теплота перехода при фазовых превращениях зависит от ряда факторов и прежде всего от

типа перехода и химического состава стали. В табл. 1 [1] приведена теплота перехода для эвтектоидных превращений в углеродистых сталях при различных значениях содержания углерода.

*Таблица 1. Теплота эвтектоидного превращения углеродистых сталей в зависимости от содержания углерода*

Содержание углерода, %	0,15	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Теплота перехода, кДж/кг	4,18	11,85	32,2	51,8	61,3	55,8	46,1

Как видно из таблицы, теплота превращений является немонотонной функцией содержания углерода, максимальное значение соответствует содержанию углерода в сплаве, равному 0,8%. Во всех случаях теплота превращений оказывается весьма значительной и ее нужно учитывать при тепловых расчетах.

**Изменения объема.** Эвтектоидные превращения сопровождаются значительными изменениями объема, а также изменениями коэффициента линейного расширения, что является причиной появления значительных деформаций и напряжений в стальных заготовках. Из анализа объемных характеристик фаз углеродистых сталей, взятых из работы [2], видно, что изменение объема достаточно велико и составляет до 4% для чистого железа. Интересно отметить, что изменение объема не связано с теплотой выделения: при увеличении процентного содержания углерода вплоть до 0,8% тепловыделения растут, в то время как изменения объема уменьшаются. При эвтектоидном превращении из феррита в аустенит плотность материала возрастает, а коэффициент линейного расширения увеличивается.

На рис. 1 изображены результаты эксперимента по дилатометрическому исследованию относительного удлинения образца из стали 45, проведенного нами при нагреве и охлаждении. Изменение удлинения при фазовом превращении составляло примерно 0,3%, что соответствует изменению объема примерно на 1%. Интересно отметить значительный гистерезис, который испытывает кривая дилатации нагрев–охлаждение.

**Изменения упругих и пластических свойств.** Фазовые превращения приводят к изменению упругих и пластических свойств материалов, поскольку эти изменения связаны с структурными измене-

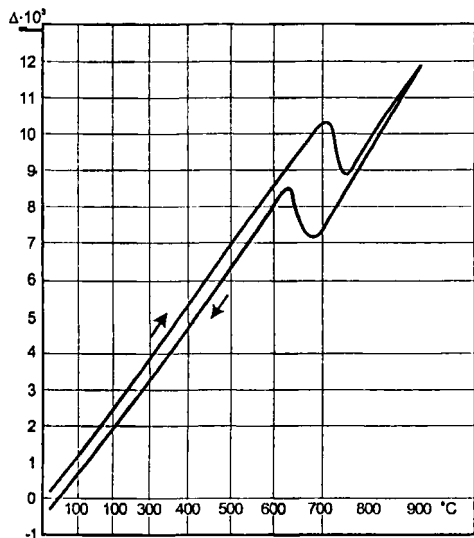


Рис. 1. Относительное удлинение стали 45 при однократном цикле (скорость нагрева и охлаждения  $400\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ )

ниями. В дальнейшем будем использовать самые общие оценки этих свойств, которые можно суммировать как следующие:

модуль упругости не претерпевает принципиальных изменений; для оценки можно полагать его постоянным или медленно меняющимся на протяжении фазового перехода [3];

предел текучести падает до минимальных значений, которые с трудом могут быть оценены, поэтому будем полагать его некоторой константой, меньшей значений при  $500\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

коэффициент Пуассона будем считать постоянным, его изменения не являются принципиальными при оценке.

**Алгоритм расчета деформаций и напряжений в нагреваемой заготовке с учетом фазового превращения.** Для оценки напряжений и деформаций в заготовке используем гипотезу плоских сечений и аддитивность деформаций, которые выражаются формулой

$$\varepsilon(x, y) = \varepsilon_0(T) + \varepsilon_e + \varepsilon_p = A_x y + A_y x + A_0, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0(T)$  — начальная деформация, вызванная не только температурой, но и изменением объема при фазовом переходе;  $\varepsilon_e$  и  $\varepsilon_p$  — упругая и пластическая деформация;  $A_x$ ,  $A_y$  — кривизны проекций оси бруса на координатные плоскости;  $A_0$  — перемещение центра тяжести сечения.

Начальная деформация описывается следующими соотношениями

$$\varepsilon_0(T) = \begin{cases} \alpha_1 T, & \text{при } T < T_{cr}, \\ \alpha_1 T_{cr} + \Delta + \alpha_2 (T - T_{cr}), & \text{при } T \geq T_{cr}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты линейного расширения для фаз 1 и 2;  $\Delta$  – изменение линейных размеров при фазовом превращении;  $T_{cr}$  – температура фазового превращения. Связь деформаций с напряжениями выражается следующими соотношениями:

$$\sigma = E\varepsilon_e, \quad \varepsilon_p = \text{const} \quad \text{при} \quad |\sigma| < \sigma_T, \quad (3a)$$

$$|\sigma| = \sigma_T, \quad \varepsilon_e = \varepsilon_T = \text{const} \quad \text{при} \quad |\sigma| \geq \sigma_T, \quad (36)$$

где  $E$  – модуль упругости первого рода;  $\sigma_T$  – предел текучести, равный  $\sigma_T/E$ . К условиям (1)–(3) следует добавить условия равновесия, заключающиеся в равенстве нулю продольной внутренней силы, а также моментов внутренних сил относительно осей  $x$  и  $y$ . Таким образом, получаем замкнутую систему уравнений для определения коэффициентов  $A_0, A_x, A_y$ .

Интегральное уравнение, получаемое из решения системы уравнений равновесия, даже при отсутствии фазовых превращений в общем случае будет нелинейным в отличие от случая, когда можно свести нелинейное интегральное уравнение к линейному, используя пошаговую линеаризацию в области упрочнения при нелинейной зависимости напряжений от деформаций.

При определении деформаций в упругопластической среде время является параметром, от которого зависит лишь температурное поле, но в случае фазового перехода время является переменной, от которой сильно зависят деформации и напряжения. При численном решении задачи шаг изменения времени является главным фактором, влияющим на точность решения, особенно при определении деформаций в области фазового перехода, где пластичность превращения велика.

Для решения поставленной задачи использовался итерационный градиентный метод (метод наискорейшего спуска) [4].

**Численные результаты расчета упругопластических деформаций и напряжений с учетом фазового превращения при нагреве заготовки.** Температурное поле внутри заготовки описывается двумерным уравнением теплопроводности с заданными тепловыми потоками на границе. Одним из эффективных методов расчетов является метод конечных элементов, в котором область расчетов

разбивается на некоторое число элементов, а все функции интерполируются внутри элементов с помощью так называемых функций формы. В результате решение, т. е. сеточная функция температуры в узлах элементов, на каждом  $k$ -м шаге по времени находится как решение линейной системы алгебраических уравнений вида

$$\sum_i M_{ij} T_i^k = R_j, \quad i, j = 1 \dots N, \quad (4)$$

где  $M_{ij}$  – так называемая матрица жесткости, имеющая полосовую структуру;  $R_j$  – вектор правой части, зависящий от температурного поля на предыдущем шаге по времени и граничных условий;  $N$  – число узлов.

Фазовый переход сопровождается выделением или поглощением теплоты. Эта теплота может быть учтена видоизменением удельной теплоемкости так, чтобы соответствовать интегральному изменению энтальпии при нагреве или охлаждении от температуры  $T_1$  до  $T_2$ :

$$Q = q + \int_{T_1}^{T_2} c dT = \int_{T_1}^{T_2} (c + \Delta c) dT, \quad q = \int_{T_1}^{T_2} \Delta c dT. \quad (5)$$

Так, например, если, согласно табл. 1, теплота превращений составляет 32,2 кДж/кг, а интервал температур перехода 20 °С, это приводит к увеличению теплоемкости в зоне перехода на 1600 Дж/(К·кг), что значительно больше собственной теплоемкости стали.

**Симметричный нагрев заготовок.** Для исследования взаимодействия фазовых и упругопластических деформаций можно применить различные методы, наиболее полным из которых можно считать метод конечных элементов, точность которого зависит от количества элементов расчетной области. Для качественного исследования взаимодействия фазовых и упругопластических деформаций используем метод плоских сечений и пренебрегаем влиянием поперечной деформации.

Для определения деформация и напряжений при нагреве заготовок была разработана программа расчета деформаций и напряжений с учетом зависимости механических свойств от температуры, при этом температурные поля рассчитывались с использованием метода конечных элементов.

Рассмотрим пример симметричного нагрева заготовки, материалом которой является сталь 35. В табл. 2 указаны теплофизические

свойства этой марки стали. Следует отметить, что, согласно отечественным работам, теплота перехода учитывается в табличных значениях теплоемкости, поэтому мы намеренно не указали теплоемкость в диапазоне 700–800 °С, чтобы избежать двойного учета теплоты перехода. Поскольку сталь 35 содержит 0,32–0,4% углерода, теплота эвтектоидного превращения должна составлять 22–32 кДж/кг.

*Таблица 2. Теплофизические свойства стали 35*

Температура, °С	600	700	800	900
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7623	7583	7600	7549
Удельная теплоемкость, Дж/(кг · °С)	703			627
Коэффициент теплопроводности Вт/(м · °С)	38	35	29	28

В ходе численных экспериментов симметричного нагрева заготовки из стали 35 квадратного сечения 10×10 см (плотность теплового потока предполагалась постоянной и равной 50 кВт/м<sup>2</sup>) было определено, что основные изменения наклонов температурных кривых происходят внутри изделия, а угловые точки практически не «чувствуют» теплоту превращения.

Показательным является рис. 2, на котором изображены изменения температурных полей внутри заготовки. Вне фазовых переходов температурные профили представляют собой параболы. В зоне перехода они «ломаются» и тепловой поток главным образом расходуется на фазовые превращения, существенно уменьшая температурные градиенты в зоне, где переход уже осуществился. Однако при дальнейшем нагреве зона превращений продвигается внутрь заготовки и профиль температуры превращается в трапецидальный.

Этот эффект хорошо виден на рис. 3, А, где изображены температурные поля в поперечном сечении заготовки. При нагреве заготовки температурное поле деформируется из параболоида к усеченному конусу. Соответственно можно ожидать, что температурный контраст возрастет в 2 раза. Фактически изменение разности температур в численных экспериментах было меньшим, но также весьма высоким: от 80 °С при отсутствии переходов до 120 °С в конце превращений.

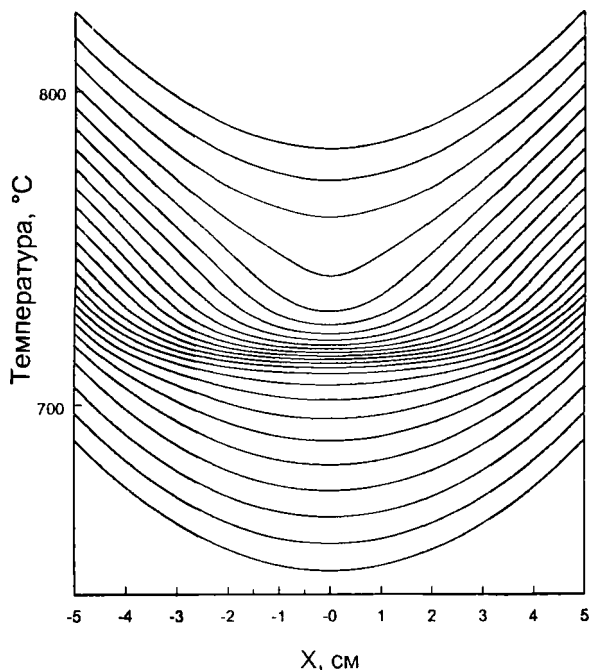


Рис. 2. Поперечные температурные профили при симметричном нагреве заготовки квадратного сечения через 10 с

Резкое увеличение температурного контраста, безусловно, влияет на температурные деформации и напряжения, однако, как указывалось выше, этот эффект невозможно отделить от других эффектов, сопровождающих фазовые превращения, и в первую очередь от эффектов изменения объема и изменения коэффициента линейного расширения. Кроме того, в момент фазовых превращений меняются также механические свойства металлов. Как указывалось выше, мы предполагаем, что модуль упругости остается без изменений в пределах зоны превращений, в то время как предел текучести резко падает.

На рис. 3, Б показаны рассчитанные осевые напряжения в заготовке при указанных параметрах. Обращает на себя внимание то, что значительная часть сечений находится в области пластического течения. Сами напряжения резко падают, что следует ожидать вследствие низкого предела текучести.

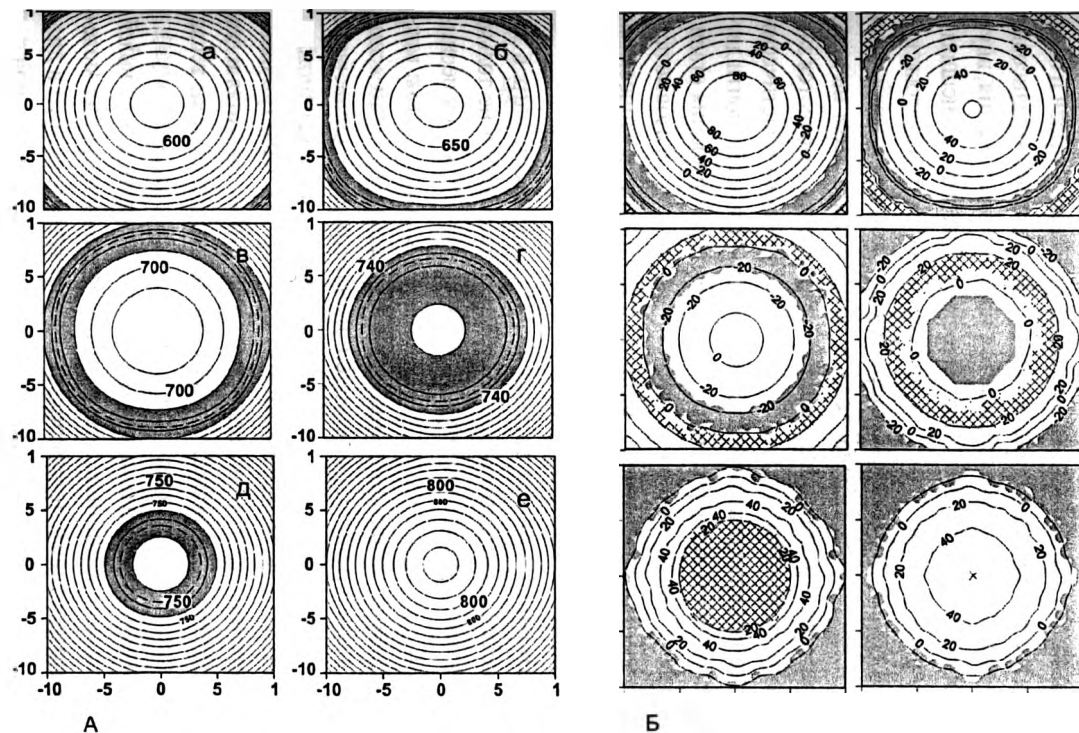


Рис. 3. Температурные поля (А) и поля напряжений (Б) при симметричном нагреве заготовки квадратного сечения через 26 мин (а), 27,5 (б), 29 (в), 30,5 (г), 32 (д) и 33,5 мин (е), прошедших от начала нагрева (заштрихованы зоны фазовых превращений и пластичности)



До фазовых превращений наибольшие напряжения возникают у краев заготовки, образуя зоны пластического сжатия. Фазовые превращения способствуют резкому уменьшению объема в зоне превращений, что приводит к изменению знака напряжений у краев и образованию зоны пластического растяжения. Вследствие балансовых соотношений эта зона вскоре разбивается на две зоны течения, внутренняя из которых соответствует пластическому сжатию, а внешняя – пластическому растяжению. Эта «сдвоенная» зона сжатия-растяжения продвигается в глубь заготовки по мере продвижением в глубь зоны превращений и затем «схлопывается» в центре. При этом на краю заготовки после завершения превращений образуется и остается значительная зона пластического сжатия. Увеличение зоны пластического течения после превращений обусловлено значительным (почти двукратным) увеличением коэффициента линейного расширения стали.

Таким образом, как показывают численные расчеты, фазовые превращения могут сопровождаться довольно сложными термическими деформациями, образуя внутри изделий зоны пластического течения разного знака.

**Несимметричный нагрев заготовок.** В реальности нагрев заготовок не является симметричным. Асимметрия нагрева не только приводит к несимметрии температурных полей, но также и к несимметричной деформации заготовок. Последнее является весьма важной характеристикой, определяющей качество нагрева: если асимметрия деформации превышает определенный предел, дальнейшая обработка заготовки может быть затруднена или вообще невозможна.

В данной работе рассмотрен простой пример несимметричного нагрева: три стороны заготовки квадратного сечения – верхняя и две боковые – находятся под воздействием постоянного потока тепла  $50 \text{ кВт/м}^2$ , в то время как нижняя грань теплоизолирована.

Как и для симметричного случая, расчет температурных полей проводился методом конечных элементов. Фазовый переход моделировался с помощью изменения эффективной теплоемкости в диапазоне  $710\text{--}740^\circ\text{C}$  так, чтобы интегральное изменение удельной энтальпии составило  $30 \text{ кДж/кг}$ .

На рис. 4 изображены кривые нагрева шести характерных точек изделия. Эти кривые демонстрируют весьма непростой характер на-

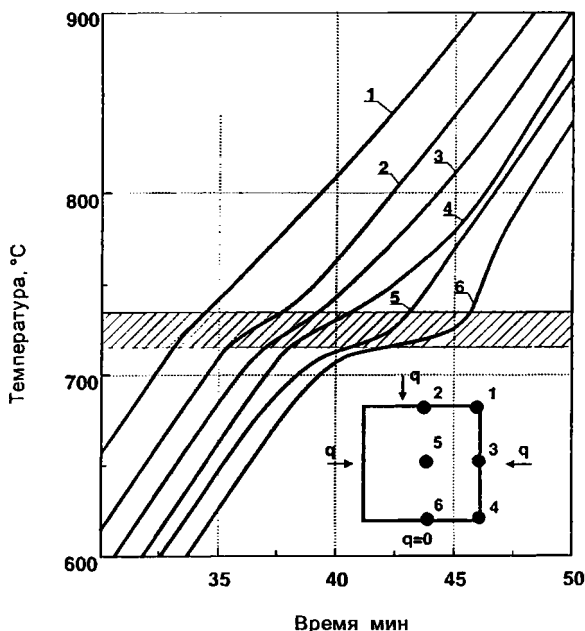


Рис. 4. Кривые (1–6) несимметричного нагрева заготовки квадратного сечения (заштрихована зона фазовых превращений)

грева. Вследствие того что зона фазового перехода проходит через различные точки в разные моменты времени, перепад температур между точками меняется существенно.

Этот эффект хорошо виден также и на рис. 5, где изображены температурные поля в поперечном сечении заготовки в различные моменты времени.

На рис. 6 представлены примеры расчета температурных полей и напряжений.

Время, в течение которого происходят фазовые превращения, в несимметричном случае грубо в 2 раза больше аналогичного времени в случае симметричного нагрева. Существенно выше оказывается также перепад температур между наиболее холодными и наиболее горячими участками изделия.

Расчет напряжений и деформаций в заготовке проводился с использованием гипотезы плоских сечений аналогично тому, как это было

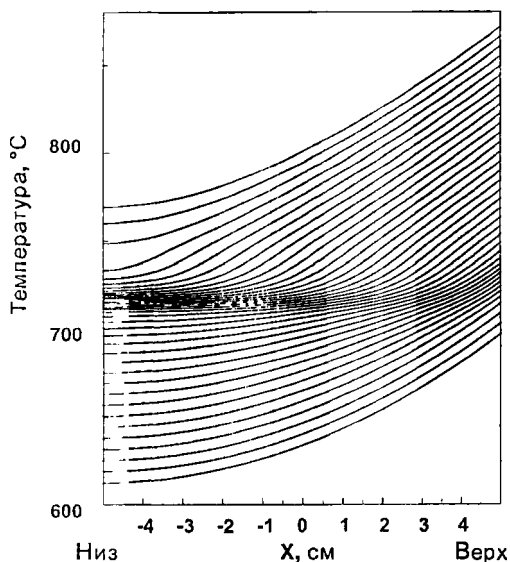


Рис. 5. Поперечные профили температур при несимметричном нагреве заготовки, проведенные с интервалом в 10 с

сделано в случае симметричного нагрева. Для случая заданного нагрева получаем два тождественно не равных нулю уравнения, которые приводят к необходимости решить два трансцендентных уравнения с двумя неизвестными. Эти уравнения решались методом наискорейшего спуска.

Ввиду характера уравнений упругопластичности данные уравнения необходимо решать с минимальными изменениями для каждого температурного поля с минимальным шагом по времени, поскольку решение зависит от предыдущего упругопластического состояния каждого элемента сечения. Однако слишком малый шаг по времени приводит к дополнительному цифровому шуму. Опытным путем было получено, что шаг по времени в 3 с, примерно соответствующий приращению температуры в  $1^{\circ}\text{C}$ , является оптимальным. Оказалось, что характер температурных напряжений существенно зависит от величины предела текучести при фазовых превращениях. Как указывалось выше, известен эффект уменьшения этого предела, хотя количественные значения данного изменения остаются малоизученными. Исходя из этого, был проведен расчет при различных значениях предела текучести при фазовых превращениях 150 МПа

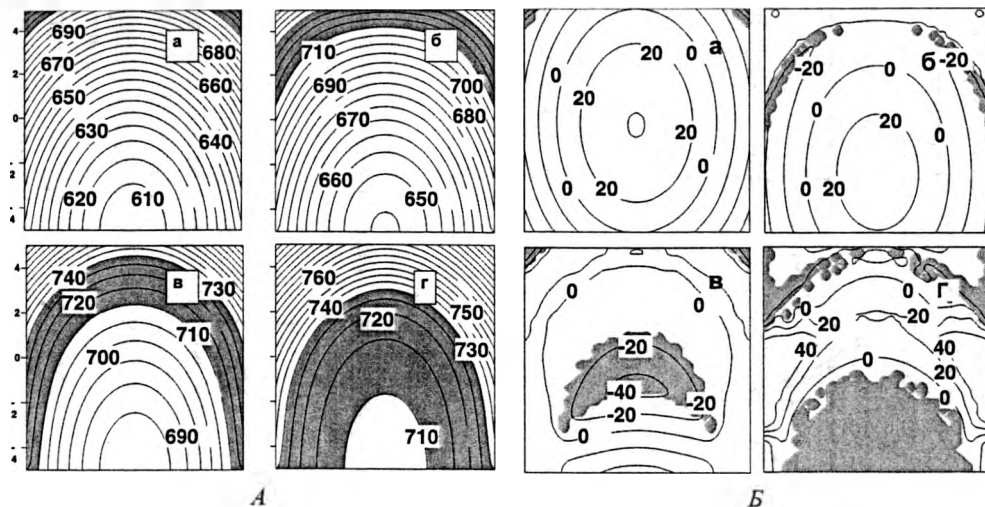


Рис. 6. Температурные поля (А) и поля напряжений (Б) при несимметричном нагреве заготовки квадратного сечения при значении предела текучести при фазовом превращении  $\sigma_+ = 150$  МПа через 33 мин (а), 35 (б), 37 (в) и 39 мин (г), прошедших от начала нагрева (заштрихованы зоны фазовых превращений и пластичности)

(рис. 6, Б), 50 и 5 МПа. Оказалось, что характер температурных напряжений существенно меняется при изменении предела текучести.

В начальный период превращений поля напряжений практически идентичны. Через 3 мин после начала превращений возникает зона пластического растяжения, которая движется в центр заготовки одновременно с продвижением к центру зоны превращений. Напряжения, остающиеся после фазовых переходов, существенно зависят от величины предела текучести; в целом эти напряжения снижаются с уменьшением предела текучести. Однако напряжения появляются вновь, потому что предел текучести возвращается к своему «обычному» значению, так что финальное распределение напряжений оказывается в целом такого же порядка, как и до превращений. В расчетах оказалось, что при значении предела текучести 50 МПа эти напряжения выше, чем в других случаях, как при более высоком, так и при более низком пределе текучести, что подчеркивает сложность процессов образования напряжений при фазовых превращениях.

Важнейшей характеристикой является также деформация заготовки при нагреве. Кривизна заготовки  $k$  может быть оценена по простому соотношению

$$k = 1/R = A_x, \quad (6)$$

где  $R$  – радиус кривизны,  $A_x$  – кривизна проекции изогнутой оси бруса (1). Прогиб заготовки длиной  $L$  определяется соотношением

$$h = \frac{L^2}{8R} = \frac{1}{8} \kappa L^2 \quad (7)$$

и, таким образом, пропорционален кривизне. На рис. 7 показаны расчеты кривизны заготовки в зависимости от времени при различных значениях предела текучести при фазовых превращениях.

До фазового перехода кривизна постоянна и составляет около  $0,0014 \text{ м}^{-1}$ , что соответствует примерно 14 см прогиба для заготовки длиной 10 м. При фазовом переходе кривизна уменьшается и может принимать отрицательные значения до  $-0,002 \text{ м}^{-1}$  (соответствующая величина прогиба 20 см). По завершении превращения прогиб вновь принимает положительные значения, однако эти значения существенно зависят от величины предела текучести при фазовом переходе.

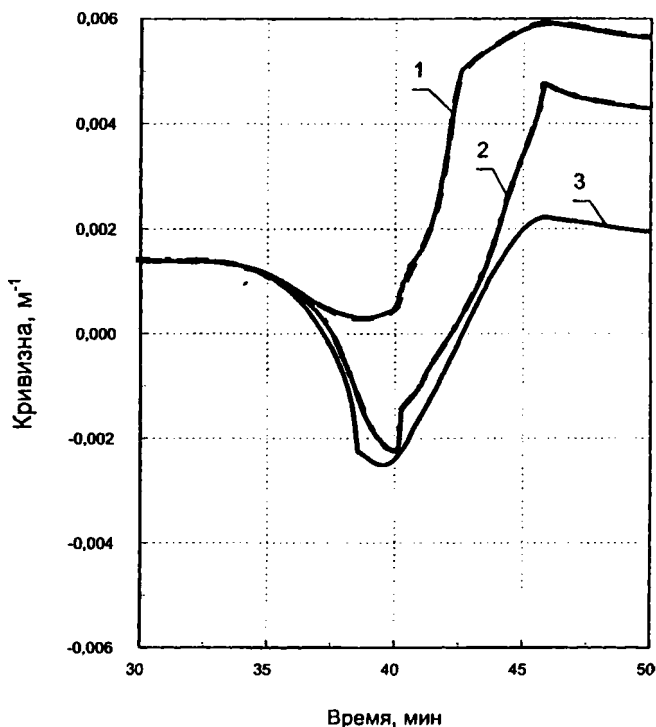


Рис. 7. Зависимость кривизны заготовки от времени при несимметричном нагреве и различных значениях предела текучести при фазовых переходах 1 –  $\sigma_T = 5$  МПа; 2 – 50; 3 –  $\sigma_T = 150$  МПа

де: при минимальном пределе текучести величина прогиба может достигать 60 см, что является недопустимым с точки зрения технологии, при высоком пределе текучести финальный прогиб составляет около 20 см соответственно увеличению коэффициента линейного расширения для стали.

\* \* \*

В рамках несвязанной квазистатической задачи термоупругости разработан приближенный метод расчета деформаций и напряжений в призматических заготовках прямоугольного сечения с учетом эвтектондных фазовых переходов углеродистых сталей. Приведены

примеры полученных численных решений для симметричного и несимметричного нагрева заготовок из углеродистой стали.

Таким образом, деформация при фазовых переходах в сильной степени определяется не только начальной деформацией (изменением объема и коэффициента линейного расширения), но также и изменением предела текучести при фазовых переходах. Неупругие деформации, возникающие в момент перехода, могут существенно изменить финальную картину деформации и увеличить кривизну заготовки и соответственно ее прогиб в несколько раз.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справ. / Под ред. Б. Е. Неймарк. – М.; Л.: Энергия, 1967. – 240 с.
2. Черепин В. Т. Экспериментальная техника в физическом металловедении. – Киев: Техніка, 1968. – 280 с.
3. Головин С. А., Пушкар А., Левин Д. М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 190 с.
4. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. – М.: ГИФМЛ, 1960. – 670 с.

*УДК 669.18 (07)*

Д. Н. АНДРИАНОВ, канд. техн. наук, В. Н. ПРОХОРЕНКО,  
А. С. ЗАЗЯН (РУП «БМЗ»)

### ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ДСП НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ

Металлургия – одна из немногих отраслей промышленности, которая при резком снижении востребованности ее продукции в стране сумела быстро переориентироваться на мировые рынки. Продукция предприятий черной металлургии оказалась не только востребованной, но и конкурентоспособной. Для сохранения и упрочнения завоеванных позиций необходимо постоянное совершенствование и развитие отрасли с учетом мировых научно-технических достижений.

В настоящее время электрометаллургические предприятия в России и странах СНГ осуществляют крупномасштабную реконструк-